

А. Е. Двойнишников, С. Б. Дорофеев

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ РАЗРУШЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВОЗДУШНОЙ УВ

Проведены исследования по моделированию диаграммы разрушения резервуара для хранения нефти и нефтепродуктов под действием воздушной ударной волны. Получены критерии подобия и проведены эксперименты на малоразмерных моделях. На основе экспериментальных данных получена диаграмма разрушения в безразмерных координатах, которую можно использовать для анализа условий разрушения резервуаров с отношением высоты боковой стенки к радиусу, равном 1,3, и наполнением от 50 до 90 %. Для примера рассмотрена возможность разрушения резервуара при взрыве облака паров углеводородов различного объема.

На предприятиях, специализирующихся на переработке, хранении и транспорте горючих и взрывоопасных веществ, возможны аварийные ситуации, сопровождающиеся взрывами и образованием ударных волн (УВ) [1—3].

Для определения потенциального ущерба в случае возникновения аварии, для понимания роли взрывных явлений в общей цепи развития процесса, необходимо уметь оценивать разрушающее действие УВ на объекты промышленного предприятия. Подобные оценки принято проводить на основе  $\Delta p - I$ -диаграммы разрушения рассматриваемого объекта [1], где  $\Delta p$  — максимальное избыточное давление во фронте ударной волны;  $I$  — импульс фазы сжатия.

Исследования, результаты которых представлены в настоящей работе, ставили перед собой задачу построения  $\Delta p - I$ -диаграммы разрушения одного из типичных элементов топливонасыщенного предприятия — резервуара для хранения нефти и нефтепродуктов. Ввиду очевидной трудности как в проведении полномасштабных экспериментов, так и в определении  $\Delta p - I$ -диаграммы расчетным путем, поставленная задача решалась с использованием методов физического моделирования.

Большинство имеющихся в литературе данных основано только на одном параметре ударной волны —  $\Delta p$ , причем рассчитать импульс волны не представляется возможным. Исключение составляет работа [4], где наряду с  $\Delta p$  приводится и мощность взрыва, однако количество представленных данных не позволяет построить  $\Delta p - I$ -диаграмму. Как указывается в [4, 5], резервуар разрушается в результате разрыва соединения днища и стенки резервуара из-за деформации тонкостенной оболочки. Далее под разрушением резервуара будем понимать такое повреждение, в результате которого полностью теряется его содержимое за короткий промежуток времени.

**Моделирование процесса взаимодействия.** Метод моделирования, используемый в данной работе, основан на пахождении таких параметров волны  $\Delta p$ ,  $I$ , при которых происходит определенное изменение количества движения массы жидкости, со следующими основными предположениями:

- 1) резервуар разрушается в результате движения содержащейся в нем жидкости, вызванного действием УВ;
- 2) условием разрушения резервуара, наполненного жидкостью, может служить достижение критической величины импульса, сообщаемого жидкости УВ.

Перейдем теперь к составлению системы определяющих параметров, описывающих передачу импульса от УВ резервуару. Площадь поверхности, подверженную действию сил давления, определим радиусом резервуара  $R$  и высотой стенки  $H$ . Инерцию учтем вводом массы  $M$  (за массу резервуара можно принять массу содержащейся в нем жидкости, пренебрегая массой оболочки), а вес тела — посредством ускорения свободного падения  $g$  (этот параметр необходим только в случае учета

силы трения). Ударную волну будем характеризовать величинами  $\Delta p$ ,  $I$  и скоростью фронта волны  $U$ . Поскольку  $U = f(\Delta p, p_0, c_0)$ , где  $p_0$  — атмосферное давление,  $c_0$  — нормальная скорость звука в воздухе, получаем следующую систему определяющих параметров:

$$\Delta p, I, M, g, R, H, c_0, p_0.$$

Импульс, сообщаемый телу волной, можно представить функцией:

$$Q = \psi(\Delta p, I, M, g, R, H, c_0, p_0).$$

Поскольку  $M, R, c_0$  имеют независимые размерности, принимая их за основные величины, в безразмерном виде получим:

$$\frac{Q}{Mc_0} = \varphi \left( \frac{\Delta p R^3}{Mc_0^2}, \frac{IR^2}{Mc_0}, \frac{gR}{c_0^2}, \frac{H}{R}, \frac{p_0 R^3}{Mc_0^2} \right).$$

Критерий  $p_0 R^3 / (Mc_0^2)$  свидетельствует о том, что при моделировании должно выполняться условие для плотности  $\rho = \text{const}$ , а критерий  $gR/c_0^2$  — о том, что при постоянстве  $g$  и  $c_0$  необходимо сохранять  $R = \text{const}$ . Следовательно, полного подобия при уменьшении размеров достичь нельзя. В исходной системе (тонкостенная оболочка, наполненная жидкостью) сила трения не играет существенной роли в процессе передачи импульса. Таким образом, масса тела (ускорение свободного падения) не может оказывать влияния на рассматриваемый процесс через силу трения. Ускорение свободного падения существенно для описания завершающей части процесса — взаимодействия движущейся жидкости с оболочкой, приводящего к ее разрушению. В соответствии с постановкой задачи, остановимся здесь только на моделировании первой части — передачи импульса к объему жидкости без процесса разрушения.

Принимая дополнительно  $\rho = \text{const}$  и  $H/R = \text{const}$ , получим следующую упрощенную систему определяющих параметров, которую будем использовать при анализе экспериментальных данных:

$$\frac{Q}{Mc_0} = \chi \left( \frac{\Delta p R^3}{Mc_0^2}, \frac{IR^2}{Mc_0} \right) = \chi(\bar{\Delta p}, \bar{I}),$$

где  $\bar{\Delta p}, \bar{I}$  — безразмерные давление и импульс.

Действительно, процесс взаимодействия УВ с телом в целом характеризуется двумя промежутками времени, определяемыми величинами  $R/U$  и  $T$  ( $R$  — характерный размер тела,  $T$  — длительность фазы сжатия). Сообщаемый телу импульс в двух предельных случаях будет кратен  $\Delta p(R/U)F$  (длинная волна) и  $\Delta pTF$  (короткая волна),  $F$  — эквивалентная площадь сечения (тела), перпендикулярная направлению распространения УВ. Поскольку  $F \propto R^2$ , а импульс волны  $I \propto \Delta p \cdot T$ , то, перейдя к безразмерному виду и учитывая, что  $U = c_0(1 + 6/7)\Delta p/p_0)^{1/2}$  [6], после очевидных преобразований (замена  $\Delta p/p_0$  на  $\Delta p R^3 / (Mc_0^2)$  и  $p_0 R^3 / (Mc_0^2)$ ) получим те же безразмерные комбинации, описывающие сообщенный телу импульс, которые следовали из теории размерности.

**Постановка и проведение экспериментов.** Моделирование разрушения резервуара на оболочечной конструкции, наполненной жидкостью, практически невозможно для малоразмерных моделей, так как требует слишком тонкой оболочки (толщина обратно пропорциональна квадрату размера модели [7]). Поэтому решение задачи разделили на две части: 1) определение параметров волны, соответствующих равным уровням переданного импульса и 2) приведение в соответствие уровня переданного импульса с уровнем импульса, необходимым для разрушения резервуара по имеющимся литературным данным. Для первой части задачи рассмотрена возможность использования жестких массивных тел геометрически подобных резервуару. В этом случае, для используемой системы определяющих параметров необходимо дополнительно обосновать исключение  $g$  и, вообще говоря, сохранять постоянным коэффициент трения.

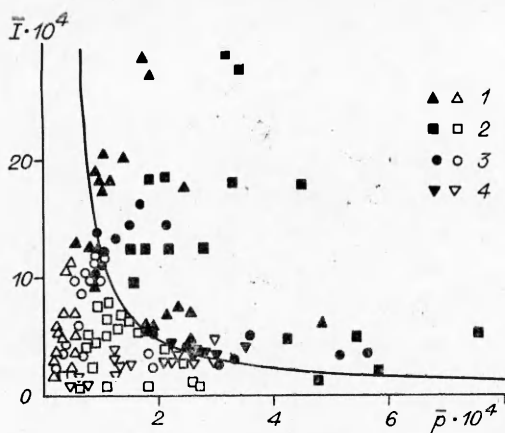


Рис. 1. Результаты экспериментов.

$M$ , кг: 1 — 8, 2 — 27, 3 — 55, 4 — 3100—4800 кг; темные точки — смещение, светлые — отсутствие смещения.

В представленных экспериментах уровень переданного импульса определялся по смещению моделей. При этом возможны характерные случаи: тело смещается в основном после взаимодействия с волной; смещение происходит в процессе взаимодействия. В первом случае переданному импульсу соответствует равное смещение объекта. Во втором в процессе взаимодействия тело приобретает количество движения и теряет его. Здесь мерой максимального безразмерного импульса, переданного телу в процессе взаимодействия, может служить относительное смещение модели. В первом варианте масштабом сил сопротивления движению служит масса тела (при коэффициенте трения равном 1), во втором — характерная сила давления на боковую (торцевую) поверхность тела. Второй случай должен наблюдаться при характерной силе давления, много большей массы тела. При этом возможен отрыв тела от основания и затекание УВ. Движение приобретает сложный характер и не сводится к скольжению тела вдоль основания.

Массу тела (ускорение свободного падения) можно не учитывать в системе определяющих параметров. Используемые в экспериментах параметры УВ, массы и размеров модельных тел определяли отношением изучаемых процессов ко второму случаю. Считалось, что равному относительному смещению моделей соответствует равный максимальный безразмерный импульс, сообщаемый телу в процессе взаимодействия. Предполагалось, что характер сопротивления движению одинаков для всех используемых моделей. Выполнение этих предположений проверялось с использованием моделей с широким диапазоном размеров и масс. Экспериментальная часть работы заключалась в регистрации параметров ударной волны и результата ее действия на модель.

В качестве моделируемого объекта выбран резервуар с типичным соотношением  $H/R=1, 3$  и  $\rho=450 \div 900$  кг/м<sup>3</sup>. Использовано четыре типа моделей (с  $H/R=1, 3$ ) со следующими значениями:  $R=0,12; 0,22; 0,22$  и  $1$  м,  $M=8, 27, 55$  и  $3100-4800$  кг (резервуар с переменной массой). Объект устанавливался на жесткое ровное основание, положение его фиксировалось, смещение в результате действия ударной волны измерялось с точностью  $\pm 2$  мм. Источниками создаваемых в экспериментах ударных волн служили взрыв заряда конденсированного ВВ и детонация облака топливовоздушной смеси. Схема и принцип работы диспергирующей установки, позволяющей создавать облака топливовоздушной смеси, представлены в [8, 9]. Параметры проходящей волны в экспериментах измерялись датчиками давления, установленными в непосредственной близости от модели. Точность измерения  $\Delta p$  и  $I$  ( $\Delta p=2 \div 300$  кПа и  $I=3 \div 1000$  Па·с) составляла 5%.

**Обработка и анализ экспериментальных данных.** Результаты экспериментов представлены на рис. 1 в координатах  $\Delta \bar{p}-\bar{I}$ . Малое количество экспериментальных точек в области длинных волн (большие  $\bar{I}$  и малые  $\Delta \bar{p}$ ) связано с ограничением мощности взрыва. На рис. 1 точки разделены по минимально фиксируемому смещению  $(0,01 \div 0,02) \cdot R$ .

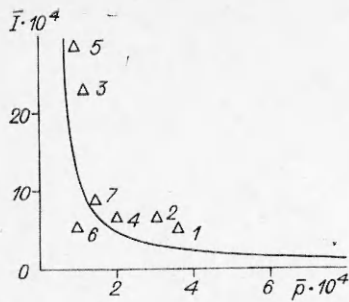


Рис. 2. Диаграмма разрушения резервуара под действием ударной волны; кривая соответствует уравнению (1), точки — литературным данным.

$2R$ , м: 1—3—30, 4, 5—22, 6, 7—15; наполнение, %: 1, 3, 5, 6—90, 2, 7—50, 4—50—90;  $W$ , кт: 1, 2, 4, 6, 7—1, 3, 5—500.

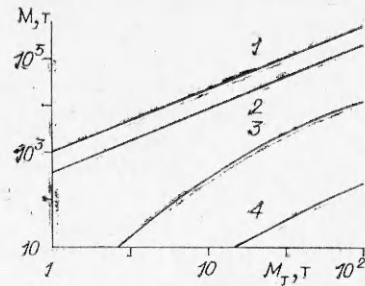


Рис. 3. Зависимость максимальной массы резервуара, который будет разрушаться, от массы топлива в облаке;  $H/R = 1,3$ .

1 — детонация, наполнение резервуара 50 %; 2 — детонация, 100 %; 3 — дефлаграция, 50 %; 4 — дефлаграция, 100 %.

Если по границе области смещения провести кривую, то она будет объединять точки, характеризующиеся равной величиной импульса, переданного телу при взаимодействии с ударной волной. Разделение экспериментальных точек по большей величине относительного смещения (не показано на рисунке) соответствует, в рамках используемых предположений, большей величине переданного импульса.

Сопоставление экспериментальных результатов для тел с массами от нескольких килограмм до нескольких тонн показало, что предположение об одинаковом характере сопротивления движению после взаимодействия с УВ выполняется в пределах точности экспериментальных данных. Изменение плотности модельных тел в экспериментах от 650 до 1300 кг/м<sup>3</sup> также не отражается на результатах (см. рис. 1) в пределах разброса экспериментальных данных. В связи с этим, при нахождении граничной кривой различие в плотности модельных тел не учитывалось.

Аппроксимационная формула граничной кривой получена следующим образом. На координатное пространство  $\Delta\bar{p} - \bar{I}$  накладывалась сетка с шагом по оси абсцисс и ординат, соответственно равным интервалам ошибок измерений  $\Delta\bar{p}$  и  $\bar{I}$ . Затем выбирались те ячейки, которые содержат экспериментальные точки, характеризующие как смещение, так и его отсутствие. Узлы этих ячеек составили совокупность точек, по которым методом наименьших квадратов была подобрана аппроксимационная формула

$$(\bar{I} - \bar{I}^*)(\bar{p} - \bar{p}^*) = k \quad (1)$$

или в размерном виде

$$\bar{I} = \bar{I}^* \frac{Mc_0}{R^2} + \frac{kMc_0^3}{R^5(\Delta p - \bar{p}^*Mc_0^2/R^3)}, \quad (2)$$

где  $\bar{I}^* = 3 \cdot 10^{-5}$ ;  $\bar{p}^* = 4 \cdot 10^{-5}$ ;  $k = 7 \cdot 10^{-8}$ . Среднее квадратичное отклонение экспериментальных точек от граничной кривой составляет 30 %.

На рис. 2 представлены безразмерная  $\Delta\bar{p} - \bar{I}$ -диаграмма разрушения (1) и точки, соответствующие разрушению резервуаров [4], для ядерных взрывов мощностью  $W = 1$  и 500 кт и резервуаров с  $H/R = 1,3$ . В связи с неопределенностью в данных для резервуара диаметром 22 м при взрыве с  $W = 1$  кт, представленная на рисунке точка соответствует средним значениям  $\Delta\bar{p}$  и  $\bar{I}$ , полученным при наполнении 50 и 90 %. Литературные данные по разрушению резервуаров согласуются с экспериментальной кривой (в координатах  $\Delta\bar{p} - \bar{I}$ ), характеризующей определенную величину импульса, передаваемого объекту при взаимодействии с УВ и соответствующей минимально фиксируемому смещению моделей  $(0,01 \div 0,02) \cdot R$ . Очевидно, что при других выбранных величи-

нах смещения, расположение граничной кривой будет иным и соответствовать другому уровню импульса. Однако корреляция с литературными данными означает, что такая величина переданного импульса соответствует минимально необходимой для разрушения натурального объекта, а уравнение (1) можно использовать для описания граничной кривой разрушения резервуара.

Уравнение (2) позволяет построить  $\Delta p - I$ -диаграмму разрушения для резервуара с отношением высоты боковой стенки к радиусу  $H/R = 1,3$  и наполнением от 50 до 90 %.

Рассмотрим в качестве примера условия разрушения резервуаров при дефлаграции облака паров углеводородов — одного из распространенных и разрушительных явлений при аварии [2]. Для определения параметров ударных волн используем данные работы [10], где приводятся результаты экспериментального моделирования аварийных взрывов паровых облаков, образованных разрушением резервуара под давлением массой до 100 т, а также анализ трех аварий, происшедших в Людвигсхафене в 1943 г. (выброс составил 16,5 т), в 1948 г. (30,4 т) и во Фликсборо в 1974 г. (56 т). На основе этих данных и соотношения (1) построена зависимость максимальной массы резервуара, который может разрушиться, от массы топлива в облаке (рис. 3). Отметим, что приводимые в [10] данные соответствуют горению переобогащенного облака. Для сравнения на рис. 3 построены зависимости для детонации облака того же состава. Параметры ударной волны для детонационного режима рассчитывались по известным соотношениям [1]. Как видно из рисунка, опасными с точки зрения разрушения резервуаров могут стать выбросы углеводородов в количестве 10 т и более с последующим сгоранием облака в дефлаграционном режиме (скорость горения  $\approx 250$  м/с).

Таким образом, в данной работе на основе физического моделирования действия ударной волны на резервуары предложена  $\Delta p - I$ -диаграмма разрушения резервуаров различного объема, которая может быть использована для анализа аварийных ситуаций.

Авторы выражают благодарность В. И. Алексееву, С. М. Вельмакину, А. В. Жернову и В. П. Сидорову за помощь в проведении экспериментальных работ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия.— М.: Мир, 1986.
2. Маршалл В. Основные опасности химических производств.— М.: Мир, 1989.
3. Легасов В. А., Чайванов Б. Б., Черноилеков А. Н. // Безопасность труда в промышленности.— 1988.— № 1.— С. 44—51.
4. Действие ядерного оружия.— М.: Воен. изд-во М-ва обороны СССР, 1963.
5. Walker F. E. Stanford Research Inst., 1969.
6. Baker W. E. Explosions in air. Univ. Texas Press, Austin and London. 1973.
7. Арзунян А. С., Афанасьев В. А., Прохоров А. Д. Сооружение нефтегазохранилищ.— М.: Недра, 1986.
8. V. I. Alekseev, S. B. Dorofeev, V. P. Sidorov et al. Prepr. IAE — 4872/13, Moscow — Atominform, 1989.
9. Алексеев В. И., Дорофеев С. Б., Сидоров В. П. и др. // Сб. науч. тр. ИАЭ им. И. В. Курчатова.— М.: Изд-во ИАЭ, 1989.— С. 90—91.
10. Giesbrecht H., Hemmer G., Hess K. et al. // Ger. Chem. Eng.— 1981.— 4.— P. 315—325.

г. Москва

Поступила в редакцию 5/III 1990,  
после доработки — 5/XII 1991

**Замечания редакции к статье  
А. Е. Двойнишникова и С. Б. Дорофеева**

*Выводы авторов редколлегии журнала не может считать вполне обоснованными. За меру одинакового безразмерного импульса, переданного жесткой модели резервуара ударной волной, ошибочно выбрано одинаковое относительное смещение модели. Это произошло из-за необоснованного отбрасывания параметра с ускорением силы тяжести. Задавая профили  $UV$  простых форм (прямоугольный, треугольный или с экспоненциальным спадом), легко получить явные выражения, показывающие, что одинаковому безразмерному переданному импульсу ближе соответствует одинаковое абсолютное смещение при любой длительности волны.*

*Несмотря на эту погрешность, редколлегия решила статью опубликовать ввиду уникальности экспериментального материала и для привлечения внимания к важной проблеме.*